Les sols forestiers

Deuxième article de la série sur les sols forestiers commencée dans le numéro 246.

Evolution de la fertilité chimique des sols forestiers Recommandations pour une gestion durable.

Maurice Bonneau et Jacques Ranger
INRA Centre de Nancy - Equipe Cycles biogéochimiques
54280 Champenoux
Tél. : 03 83 39 40 68. Fax : 03 83 39 40 69. E-mail : nom nancy.inra.fr

Présentation générale des sols forestiers

Par leur origine, les sols forestiers ne sont pas très différents des sols agricoles, si ce n'est qu'à l'intérieur d'une région donnée, ce sont les plus pauvres ou les plus caillouteux qui ont été réservés à la forêt et que, contrairement aux sols agricoles, ils n'ont pas été enrichis par l'homme. Bien plus, ils ont servi dans de nombreux cas de source d'éléments nutritifs, ce qui a opéré progressivement un transfert de fertilité des forêts vers les sols agricoles. C'est le cas notamment des pratiques telles que l'essartage* et le soutrage** . Les sols de très anciennes forêts sont donc le plus souvent des sols relativement plus pauvres que les sols agricoles comparables. Par contre, les sols forestiers issus de déprises agricoles, se trouvent enrichis et leur fonctionnement est relativement spécifique (*Koerner et al., 1998*). C'est le cas en particulier du cycle de l'azote : les anciennes terres agricoles des Vosges présentent une nitrification plus élevée que le sol analogue jamais mis en culture (*Jussy et al., 1999*).

On peut donc penser que la production des plantations réalisées sur d'anciennes terres agricoles, par exemple la majorité de celles qui ont été subventionnées par le FFN, ne représente pas le potentiel réel du sol, mais celle du reliquat de l'enrichissement agricole. Il faudra tenir compte de ce phénomène, et envisager dans les nouvelles générations un rééquilibrage de la production en fonction du niveau de fertilité auquel reviendra le sol forestier.

*Essartage : défricher un terrain boisé pour le semer.
**Soutrage : exportation de la litière forestière pour servir de litière aux animaux.

Les statistiques portant sur la comparaison entre les sols agricoles et forestiers montrent les grandes tendances suivantes (*Badeau et al., 1999*) :

1 - concernant les classes de sols : les sols bruns, les sols hydromorphes, les podzols et les rankers sont plus représentés en forêt qu'en sol agricole, à l'inverse, les sols alluviaux et les sols lessivés sont plus représentés dans les sols agricoles ; les autres classes ne montrent pas de différence réellement significative,

2 - les sols forestiers sont nettement plus acides (1,5 Unité pH de moins sur la médiane) et contiennent significativement plus de matière organique que les sols agricoles.

Ces paramètres influencent notablement la fertilité chimique des sols.

La fertilité des sols forestiers : définition

Il s'agit de l'ensemble des paramètres physiques, chimiques et biologiques déterminant l'aptitude du sol à soutenir une production. Nous ne traiterons ici que de sa composante chimique, les éléments nutritifs.

Il faut faire la différence entre la fertilité actuelle ou instantanée d'un sol, définie à partir des analyses de sol,

***Tableau I** : Comparaison des prélèvements au sol, immobilisation et restitution par les litières de quelques peuplements forestiers.*

site	essence/âge		MS	N	P	K	Ca	Mg
Ardennes	Epicéa commun	Prélèvement au sol		70,8	5,6	37,3	26,9	4,7
Nys et al., 1983	45 ans	Immobilisation dans la biomasse pérenne	5,9	8,7	0,8	5,2	6,8	1,1
		Restitution au sol par les litières		54,3	3,5	7,2	14,2	1,7
Vosges	Epicéa commun	Prélèvement au sol		70,2	4,9	23,6	24,1	4,4
Ranger et al., 1992	75 ans	Immobilisation dans la biomasse pérenne	8,9	30	2,5	6,5	14,1	2,1
		Restitution au sol par les litières		33,3	3,9	6,9	15,2	2,3
Beaujolais	Douglas	Prélèvement au sol		31,1	2,5	15,0	23,7	2,1
Ranger et al., 1995	60 ans	Immobilisation dans la biomasse pérenne	7,7	7,5	0,8	3,1	10,1	0,7
		Restitution au sol par les litières		23,6	1,7	5,1	13,6	1,4

qualitativement (concentrations) voire moins fréquemment quantitativement (quantité pour une profondeur donnée de sol), et la fertilité à long terme définie comme la réserve totale d'un sol. Ces deux grandeurs ne sont pas indépendantes, mais reliées entre elles par un flux : le flux d'altération, qui détermine la capacité du sol à maintenir une fertilité actuelle constante. Ce flux d'éléments est issu de l'altération des minéraux du sol, par des mécanismes physiques (division et augmentation des surfaces), chimiques (par décomposition acide surtout), et biologiques (mécanismes liés à l'activité biologique). Il constitue, avec les apports atmosphériques, les seules entrées des écosystèmes traités extensivement.

La fertilité d'un sol forestier n'est pas un donnée statique, mais résulte d'une somme de mécanismes dans lesquels la plante intervient largement : c'est le cycle biologique (ou biogéochimique si on considère son ouverture sur le cycle purement géochimique, par les entrées atmosphériques et les pertes par drainage) (*Ranger et Bonneau, 1984*). Il s'agit d'une part du prélèvement par les plantes d'éléments dans les réserves disponibles du sol et d'autre part des restitutions d'éléments par la matière morte (litière de feuilles, branches et racines), qui ramènent à la surface du sol des éléments puisés sur tout le profil pédologique. Ce mécanisme est particulièrement important en sol acide pour le calcium. Les exemples du tableau 1 montrent l'importance du recyclage biologique dans la fertilité des sols forestiers.

En fait, la fertilité chimique d'un sol forestier résulte plus de la capacité de l'écosystème à recycler ses éléments que d'une valeur absolue, souvent faible, des stocks existants. Cette fertilité présente donc un caractère vulnérable, dans le mesure ou le pool d'éléments mis en jeu est susceptible de décroître si les pratiques sylvicoles sont inadaptées à un système à faibles intrants.

Evolution de la fertilité des sols forestiers

Le rôle des pratiques sylvicoles

Les pratiques sylvicoles se traduisent par des contraintes plus ou moins fortes sur la fertilité des sols forestiers : les lois agronomiques classiques s'appliquent comme aux sols agricoles et il est toujours nécessaire d'établir des bilans de fertilité pour connaître l'intensité de la contrainte appliquée au sol en fonction de telle ou telle pratique.

- récolte de tout ou partie de la biomasse produite

Les mesures de biomasse compartimentée (masses respectives des rameaux, branches, tronc, écorces...) montrent toujours que les petits compartiments de la biomasse sont les plus riches en éléments nutritifs (tableau 2) : la récolte des houppiers conduit à des exportations très fortes par rapport à l'exploitation des seuls troncs, surtout s'ils sont écorcés.

- diminution de la longueur des révolutions

La diminution de la longueur des révolutions se traduit par une proportion de plus en plus élevée de tissus jeunes, riches en éléments minéraux, dans la biomasse récoltée, donc par une augmentation de l'exportation d'éléments nutritifs par unité de biomasse récoltée.

site	essence/âge		MS	N	P	K	Ca	Mg
Ardennes Nys et al., 1983	Epicéa commun 45 ans	Aiguilles	18,9	237	19	87	91	14
		branches	34,2	126	13	44	70	10
		écorce de tronc	11	55	1	25	73	7
		bois de tronc	116	135	4	69	146	20
Vosges Ranger et al., 1992	Epicéa commun 75 ans	Aiguilles	20,8	251	36	84	64	21
		branches	48	275	65	124	178	64
		écorce de tronc	16,3	79	9	35	142	16
		bois de tronc	343	224	18	111	229	45
Beaujolais Ranger et al., 1995	Douglas 60 ans	Aiguilles	16,1	225	16	79	129	16
		branches	49,7	121	13	44	162	13
		écorce de tronc	45,0	154	20	99	135	14
		bois de tronc	307,0	195	9	66	94	15

MS= matière sèche en t par ha ; éléments en kg par ha.

***Tableau 2** : Comparaison des stocks d'éléments dans les différents compartiments de la biomasse de peuplements forestiers.*

- changement d'essence

La substitution d'essence conduit à des modifications sensibles du fonctionnement des écosystèmes pour diverses raisons :

i) les essences introduites conduisent à des modifications de l'équilibre primitif de la matière organique du sol, en particulier quand les résineux remplacent les feuillus. Ceci est lié à la qualité de la matière organique restituée, mais également au microclimat induit, à la microflore spécifique associée et à un éventuel changement de la localisation des racines (*Ranger et Nys, 1987*).

ii) Les essences ont des besoins spécifiques en éléments nutritifs, mais c'est surtout la quantité de biomasse produite qui va déterminer le prélèvement au sol (*Augusto et al., 1999*). Pour une essence donnée, il est possible de prévoir les quantités prélevées de chaque élément chimique en fonction de la biomasse produite (donc du volume produit) : voir par exemple figure 1), pour le calcium prélevé par une futaie d'épicéa. Mais il reste beaucoup de travail à faire pour disposer de l'information pour l'ensemble des principales essences françaises.

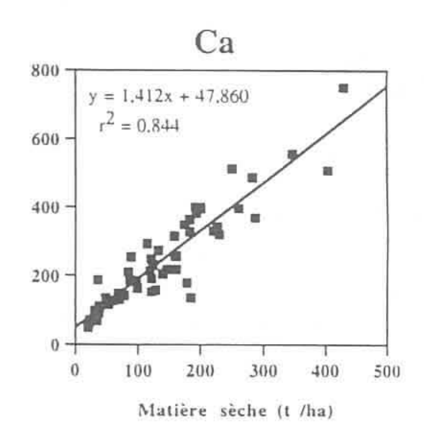


Figure 1 : Quantité de calcium prélevée pour 55 peuplements d'Epicéa commun en Europe en fonction de la biomasse produite.

iii) Les essences forestières développent un houppier de large dimension, qui joue un rôle important de filtre de la basse atmosphère. Les résineux sempervirents, sont plus efficaces à cet égard que les feuillus situés en conditions comparables. En zone polluée, les conifères vont permettre des apports atmosphériques au niveau du sol beaucoup plus élevés que les feuillus, qu'il s'agisse d'éléments utiles (calcium et magnésium des poussières terrigènes, ou azote en quantité modérée, ou nuisibles (acidité, ammonium en excès) (*Nys, 1987*).

- méthode de récolte

La coupe-à-blanc est la méthode la plus généralement utilisée pour récolter aisément les peuplements forestiers. Le changement brutal du pédoclimat peut se traduire par des pertes importantes d'éléments par drainage : tout dépend de la durée de maintien du sol à nu. En effet l'élimination des arbres se traduit par une augmentation de l'humidité et de la température du sol, conditions favorables pour l'activité biologique et la minéralisation brutale de la matière organique et pour le drainage, si aucune végétation ne peut capter les éléments ainsi libérés.

- traitement des rémanents

L'élimination des rémanents par brûlage conduit à une perte d'éléments biodisponibles, notamment azote et phosphore par volatilisation et par altération des couches humifères du sol. L'andainage peut conduire à une diminution de fertilité du sol car elle concentre les éléments contenus dans les rémanents sur une surface restreinte et se traduit souvent par un décapage des couches humifères dont le rôle est déterminant pour la fertilité des sols pauvres.

Au total, il faudra donc distinguer les différents scénarios sylvicoles pour quantifier les contraintes appliquées à la fertilité des sols forestiers.

Quatre systèmes sont identifiables :

i) les forêts pseudo-naturelles qui ne font pas l'objet de sylviculture sinon de protection,
ii) les forêts d'essences naturelles traitées de manière extensive,
iii) les plantations semi-intensives et
iv) les plantations intensives.

Les cas extrêmes sont les plus simples dans la mesure où les sols des forêts non traitées n'évoluent que très lentement et qu'à l'opposé les sols des plantations intensives doivent avoir dès le départ une fertilité suffisante et elle doit être entretenue par apports de fertilisants, pour soutenir une production élevée. A la limite, les taillis à très courte rotation (TTCR) se comportent plus comme des cultures annuelles que comme des peuplements forestiers.

Le cas des forêts aménagées de manière semi-intensive est le plus critique, car l'intensification entraîne une demande plus forte à l'écosystème, sans restitution des éléments exportés. On va donc se demander , dans le cadre d'une gestion durable, si le sol peut supporter cette demande accrue ou s'il faut équilibrer le bilan par des apports artificiels.

Le schéma déjà ancien de Switzer et Nelson (1973) montre clairement la relation entre le degré d'intensification de la sylviculture et la demande en éléments nutritifs. Ce schéma présente un caractère très général quand à son allure, mais les valeurs absolues dépendront des situations *(**figure 2**)*.

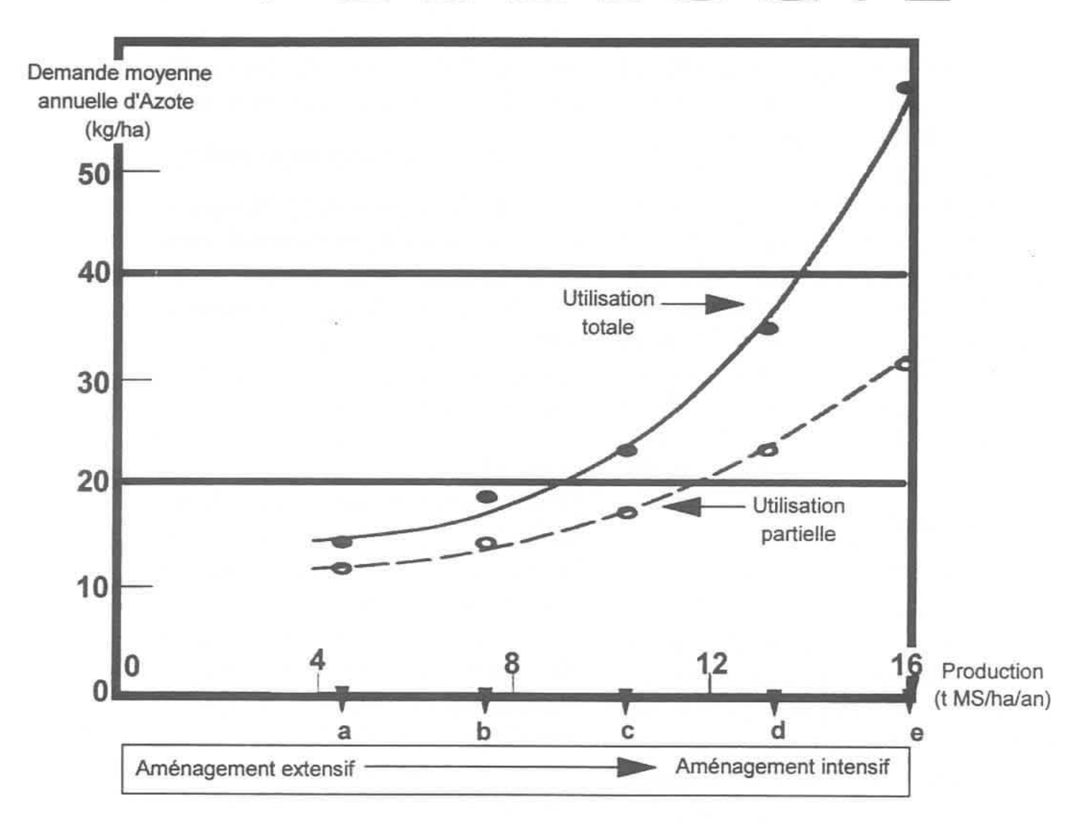
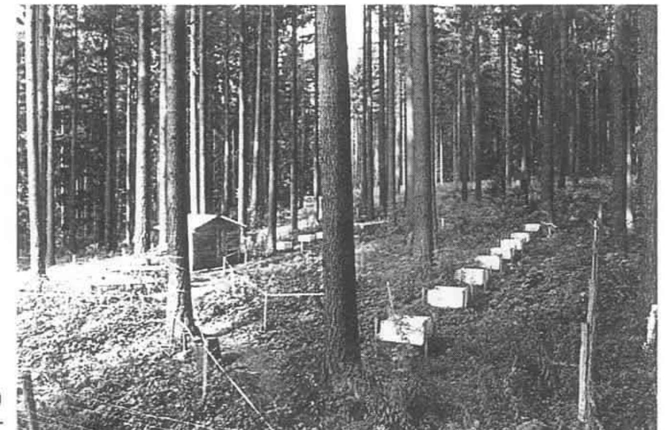


Figure 2 : relation entre le niveau d'aménagement et la demande annuelle d'azote (Switzer et Nelson.1973)
a: peuplement naturel de 40 ans
b: peuplement naturel de 30 ans
c: peuplement naturel de 10 ans
d: rotation courte (10 ans) + sélection génétique + travail du sol.
e: + fertilisation pour atteindre le potentiel maximum de l'(espèce.

Les outils de diagnostic, bien qu'ils existent, sont trop difficiles pour qu'on puisse, dans chaque cas particulier, déterminer les contraintes écologiques de la production forestière en fonction des scénarios sylvicoles. Des recommandations peuvent cependant être faites sur quelques critères simples et robustes dans une attitude conservatrice dictée par le seul principe de précaution : éviter les exportations totales de la biomasse (que ce soit directement ou indirectement par brûlage ou andainage, voire de chantier d'ébranchage en bord de coupe), proscrire les révolutions trop courtes sur les sols pauvres, éviter les coupes-à-blanc qui laissent un sol nu pendant trop longtemps. Il faudrait de plus éviter les conditions qui conduisent à la détérioration des humus (les humus dégradés sont défavorables à la nutrition des végétaux et induisent une acidification du sol ; ils en sont également le témoin). Il s'agit soit de plantations trop denses et/ou non éclaircie, en particulier dans le cas de monocultures.



*En haut:
Forêt départementale de Avenas, massif des Aiguillettes. Douglas de 60 ans. Dispositif de mesure des flux d'éléments.*

*En bas:
Même massif. Douglas de 40 ans. Dispositif de collecte des pluviométries et apports atmosphériques.
(Photos Dominique Gelhaye)*



Le rôle du climat de pollution

Les recherches sur les dépérissements forestiers liés aux "pluies acides", dont on a beaucoup parlé dans la dernière décennie, ont montré qu'ils résultaient d'une longue histoire de déséquilibre entre exportation et ressources des sols, et que les apports acides n'ont fait qu'accélérer l'acidification des sols. Ces dépérissements ont illustré les conséquences nuisibles des apports d'azote notamment, qui activent la production des peuplements et accélèrent l'appauvrissement du sol en autres éléments (calcium, magnésium ou potassium par exemple), mais également les apports utiles d'éléments nutritifs.

La gestion durable doit donc reposer sur une réflexion saine tenant compte du contexte sylvicole, du contexte environnemental (apports) et de la capacité du sol à réagir aux éventuels apports nuisibles (acides ou pouvant entraîner un déséquilibre dans l'alimentation minérale des peuplements), ou à une modification de son fonctionnement. Si l'élément a un caractère acide ou s'il génère de l'acidité (par exemple NH4), il ne va conduire à un abaissement du pH du sol que si le pouvoir tampon de ce dernier est dépassé, (verser de l'acide sur un sol calcaire ne baisse pas le pH tant que des réserves carbonatées existent). Si l'élément est un fertilisant, notamment de l'azote, l'augmentation de croissance conduira également à une acidification du sol par augmentation du prélèvement de cations basiques.

Dans le sol acide très pauvre du bassin versant d'Aubure (Vosges), par exemple, le bilan de protons établi sur le sol entier montre le rôle important des apports atmosphériques dans l'acidification du sol qui se poursuit

actuellement (*Dambrine et al., 1995 ; Poszwa et al., 1998*). Dans les sols acides mais plus riches en minéraux altérables du Beaujolais, le rôle des apports atmosphériques, pourtant au moins aussi élevés que dans les Vosges, n'a qu'une importance secondaire par rapport à l'acidification générée par l'intense minéralisation de la matière organique sur cette ancienne terre agricole (*Marques et al., 1997*).

Etablissement des bilans de fertilité

Il s'agit de la méthode de référence, qui permet de déterminer si la fertilité du sol subit ou non une dégradation. Cette méthode consiste à faire le bilan des entrées et des sorties d'éléments nutritifs de l'écosystème. Ces flux doivent auparavant être identifiés et quantifiés avec précision sur une période de temps significative. C'est une difficulté importante pour les écosystèmes forestiers où la longévité des essences est grande (*Ranger et Turpault, 1999*).

Les principaux termes du bilan sont les suivants :

. entrées = apports atmosphériques totaux, altération des minéraux du sol, fixation d'azote atmosphérique, fertilisants ou amendements s'ils existent,

. sorties = exportations par les récoltes, pertes par drainage pendant la révolution et lors des récoltes, volatilisation d'azote.

Le bilan est en général réalisé pour les éléments biodisponibles pour les végétaux, et pour des pas de temps allant de la saison à la révolution forestière complète. Les chronoséquences de peuplements sont en général utilisées pour simuler la dynamique de la fertilité au cours des phases de développement des peuplements. Les méthodologies doivent être appropriées pour intégrer les variations spatiales et temporelles, et conduire à des bilans fiables.

Les résultats permettent de tirer des conclusions sur les pratiques sylvicoles compatibles avec la pérennité de la fertilité des sols forestiers et le cas échéant de fournir les données nécessaires pour la restauration de cette fertilité (*Ranger et Bonneau, 1986*)

Malheureusement, la lourdeur de cette technologie ne permet pas d'avoir accès à cette information pour tous les écosystèmes. Il faut donc avoir recours à des diagnostics établis à partir de données partielles, le plus souvent qualitatives.

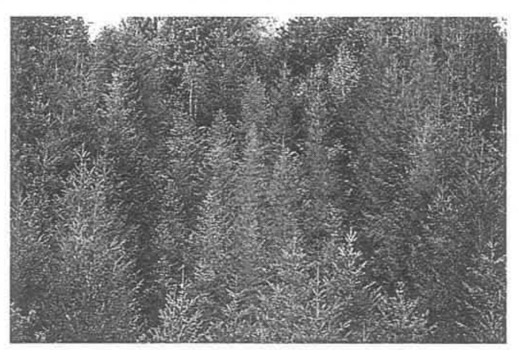
La mise en réseau des sites sur lesquels ces bilans peuvent être réalisés, devrait permettre de dégager des lois générales applicables à chaque écosystème, caractérisé par des indicateurs plus simples à acquérir.

Les résultats obtenus récemment montrent que des comportements très contrastés peuvent être observés ; l'intérêt de ces travaux réside dans la prise en compte de la dynamique de l'écosystème au cours de la révolution forestière. Il n'est toutefois pas question de généraliser ces résultats obtenus sur un nombre trop limité d'écosystèmes.

- La pessière dépérissante du site d'Aubure (Vosges), montre un bilan toujours déficitaire, quel que soit son stade de développement : la production de cet écosystème va diminuer à

terme si aucun apport artificiel n'est réalisé (*Dambrine et al., 1995 ; Fichter et al., 1998*).

- la Douglasaie de Vauxrenard (Beaujolais), montre des bilans déficitaires dans les stades jeunes, et un équilibre qui se rétablit dans le peuplement le plus âgé : le caractère durable de la gestion passe par des révolutions dépassant 80 ans et des récoltes n'exportant pas les houppiers (*Marques et al., 1997 ; Turpault et al., 1999*).



Essai de fertilisation sur Douglas : mise en place en 1967 ; sol bien acide ; traitements : T, NPKCa, PKCa, NKCa, NPK (Barbaroux- Haute-Vienne)

Restauration de la fertilité chimique des sols forestiers : quand et comment fertiliser ?

Deux cas doivent être envisagés, celui où l'on décide de remonter le niveau de fertilité du sol de façon à améliorer les conditions "naturelles" d'une station forestière donnée (c'est la fertilisation-amélioration), et celui où l'on souhaite maintenir la capacité actuelle du sol à soutenir une production (c'est la fertilisation-restitution), même si elle n'est pas optimum, ce qui est le cas général (*Bonneau, 1995*).

Principe de la fertilisation-restitution

A chaque révolution on devrait apporter au sol des éléments nutritifs en quantité égale aux pertes estimées du bilan. Mais il est illusoire de vouloir dresser, pour chaque parcelle de chaque propriété, un bilan quantitatif. C'est une opération qui demande de gros moyens, des recherches très spécialisées et qui n'est envisageable que dans des cas-types, pouvant donner une idée des pertes dans un certain nombre de conditions écologiques représentatives de la diversité de nos terroirs forestiers.

Mais on peut se rallier à des tests beaucoup plus simples, utilisables dans chaque cas, en tirant parti de la réflexion suivante. Un sol capable de supporter sans perte de fertilité les fortes exportations liées à une sylviculture intensive est, ou bien un sol bénéficiant de forts apports externes (par exemple potassium ou magnésium près des côtes grâce au dépôt d'aérosols marins) ou bien un sol caractérisé par de forts apports internes, grâce à un stock important de minéraux altérables hérités de la roche-mère. Dans l'un et l'autre cas, les apports compensent les pertes et le complexe adsorbant (4) est maintenu à un niveau élevé de saturation Réciproquement, on peut dire aussi qu'un complexe adsorbant fortement saturé est l'expression de forts apports internes ou externes capables d'équilibrer largement les exportations.

Ceci est facile à comprendre pour le calcium, le magnésium, et le potassium ou le phosphore, peut-être un peu plus difficile pour l'azote qui n'est pas retenu sur le complexe colloïdal (5). Mais on peut remplacer la notion de complexe fortement saturé par celle d'abondance de la matière organique et de sa richesse en azote car, si

		K	Ca	Mg	P2O5	Matière organique	C/N
Qualitatif	limite supérieure s	0,13	1	0,4	0,07	6%	<19
(1)	limite inférieure i	0,08	0,2	0,15	0,04	3%	> 23
Quantitatif (d'= 1,1)	limite supérieure S	130	520	125	180	3400	
kg/ha de Ca, K, Mg, N et P2O5 Duch	limite inférieure I	80	100	50	100	1500	

(1) : ces valeurs seraient par exemple, pour simplifier celles de la couche 0-20 cm et exprimées en cmol+/kg de sol pour P_2O_5 extrait par la méthode Duchaufour, en % pour la matière organique. On peut en effet penser que la couche est relativement représentative de l'ensemble du sol (en équilibre avec lui par le jeu du cycle biologique) et on sait que la majorité de l'enracinement actif s'y trouve.

***Tableau 3 :** Propositions de valeurs qualitatives et quantitatives seuils, pour déterminer les besoins en fertilisation des peuplements forestiers.*

les apports sont copieux par rapport à la consommation et la microflore du sol active, les excès éventuels d'azote peuvent être "organisés" (l'azote apporté sous forme minérale est transformé en azote organique). Une richesse suffisante de la matière organique en azote se traduit aussi par un rapport C/N (carbone organique sur azote organique) peu élevé de l'humus (inférieur à 18-20 dans l'horizon A1), et ce rapport bas traduit aussi une grande aptitude à restituer sous forme minérale assimilable par les arbres, les retours d'azote organique des litières.

Ainsi on peut imaginer qu'on puisse mettre en parallèle, au long d'une série de sols de fertilités échelonnées, les teneurs en éléments échangeables, (ou les taux de saturation) et les capacités des sols à fournir des éléments nutritifs par altération des minéraux, ou rapprocher la teneur en matière organique et son rapport C/N de sa capacité à fournir de l'ammonium ou des nitrates par minéralisation de la matière organique. On pourrait en somme rapprocher les résultats des analyses classiques de sols de la faculté d'un sol à compenser des exportations d'éléments plus ou moins importantes.

Ce n'est rien d'autre finalement que de donner aux analyses de sol qu'on interprète généralement en termes statiques (tel sol est-il capable, à un instant donné d'assurer une bonne alimentation minérale ?) un contenu dynamique (quelles quantités d'éléments un sol est-il capable de remettre dans le cycle biogéochimique pour remplacer les pertes dues à la production ligneuse et donc quelle est l'intensité de production qu'un sol peut supporter sans s'appauvrir ?)

Ne nous berçons pas d'illusions : nos connaissances actuelles sont encore bien trop faibles pour qu'on puisse transformer ainsi l'interprétation des analyses. Mais on pourrait entrevoir, dans un avenir d'une dizaine d'années peut-être, de tracer un cadre, grossier certes, mais suffisant pour guider le sylviculteur dans le choix d'objectifs de production compatibles avec une gestion durable, sans restitution sous forme d'engrais ou amendements, ou pour l'inciter, s'il souhaite accéder à une production plus forte, à restituer artificiellement par fertilisation, dans le même souci, les éléments que le sol n'injecte pas de lui-même dans le cycle biogéochimique en quantités suffisantes pour que la gestion soit durable.

Le ***tableau 3*** donne l'esquisse d'un tel cadre, qu'il faut pour le moment prendre comme une illustration concrète de ce qui pourrait se faire dans l'avenir, et non pas considérer comme une collection de données exactes et fiables.

L'utilisation d'un tel tableau serait la suivante : si la richesse du sol en un élément donné est :

- supérieure à s (ou S en quantitatif) : toute production forestière et tous systèmes d'exploitation sont possibles sans restitution de cet élément

- comprise entre s et i (S et I) : toute culture est possible mais seule l'exploitation de grumes à révolution longue (> 100 ans) est possible sans restitution. Toute exploitation totale, ou toute exploitation à révolution plus courte doit donner lieu à restitution , fonction de l'espèce et du type d'exploitation.

- inférieure à i (ou I) : tout système sylvicole, quelles que soient l'intensité d'exploitation et la longueur de la révolution, doit prévoir la restitution d'une quantité de l'élément considéré égale à la quantité exportée.

Fertilisation amélioration voire optimisation

Ce qui doit être brièvement discuté dans ce paragraphe, sans qu'il soit possible de le traiter en détail, c'est :

- L'estimation des quantités d'éléments à restituer. La question est déjà illustrée dans les paragraphes précédents (évolution de la fertilité en fonction des pratiques sylvicoles). Cette estimation devrait reposer sur des tables, établies par essences ou groupes d'essences, donnant, en fonction des classe de production, déduite des hauteurs moyennes ou dominantes des peuplements, et de l'intensité d'exploitation (totale, grumes non écorcées, grumes écorcées), la quantité d'éléments exportés. On en déduirait facilement les restitutions par différence entre l'intensité d'exploitation prévue et celle "autorisée" en fonction de la ***figure 3***.

- La répartition dans le temps de ces restitutions, afin qu'elles maintiennent le sol à un niveau de fertilité suffisant à tout moment de la révolution. Il faut pour cela tenir compte des périodes de forte consommation. Il est commode pour esquisser les grandes lignes de cette répartition, de reprendre les quatre scénarios indiqués au paragraphe II-1.

1. Forêts pseudo-naturelles traitées en forêts de protection. les exploitations sont limitées au minimum indispensable pour remplacer les vieux peuplements et assurer la régénération. Aucune restitution n'est à prévoir.

2. Forêts naturelles traitées de manière extensive. Ceci implique

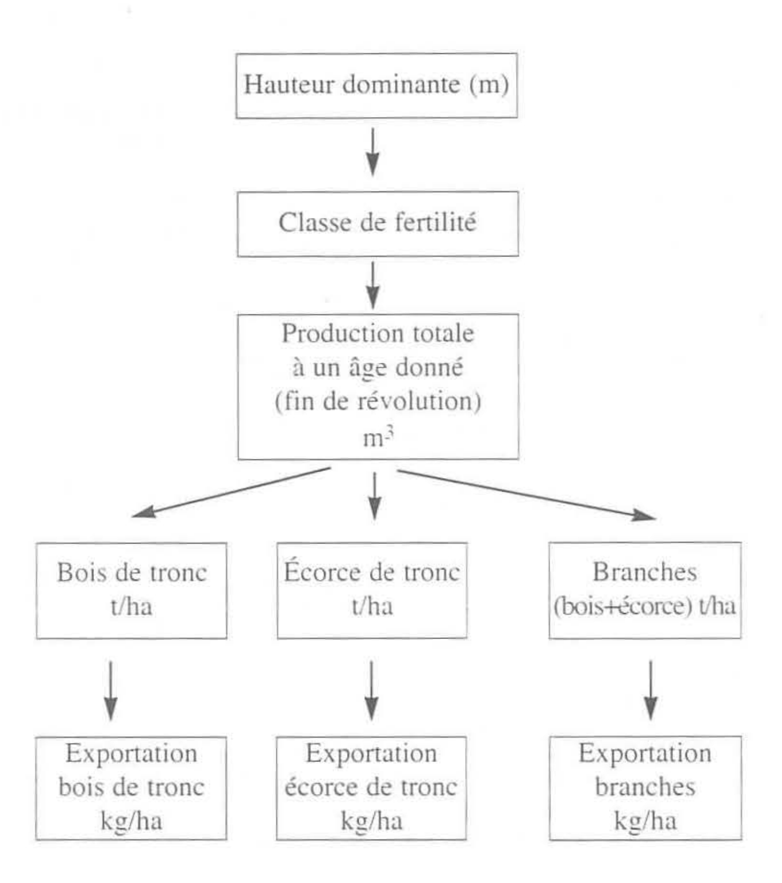


Figure 3 : *Simulation simple de l'exportation d'éléments associée aux récoltes forestières.*

généralement des révolutions longues. Les restitutions sont variables suivant le niveau de production, souvent faibles, ou même nulles, en cas de production élevée, car ce haut niveau de production est atteint sans changement d'essence et grâce au potentiel naturel du sol. Cela implique donc un sol riche, injectant régulièrement des quantités élevées d'éléments dans le cycle biogéochimique. Paradoxalement c'est en cas de faible production, résultant d'une offre faible ou déséquilibrée du sol, que des problèmes peuvent survenir et que des restitutions sont nécessaires. On les fera à trois périodes :

1) sur semis acquis, ou sur plantation, pour accélérer la croissance juvénile, assez tard pour que les semis ou plants ne soient plus gênés par la concurrence herbacée ou arbustive.

2) vers 25-35 ans, suivant l'essence, car cet âge coïncide avec une forte demande du peuplement qui est à son maximum d'accroissement courant et produit encore une forte proportion de tissus. jeunes.

3) Entre 50 et 60 ans, avant que la phase de production à très faible niveau d'immobilisation ne soit atteinte. La quantité à apporter de chaque

élément pourrait être partagée entre ces trois apports selon les proportions suivantes ; 40 %, 40 %, 20 %.

3. Forêts semi-intensives . Il s'agit souvent d'essences introduites, éventuellement améliorées sur le plan génétique, cultivées à révolution relativement courte (50 à 80 ans) et en général à production assez forte ou forte. Elles sont souvent plantées sur sol travaillé ou tout au moins dans des conditions telles que la concurrence herbacée ou arbustive puisse être efficacement maîtrisée. S'il s'agit d'anciennes terres agricoles, il est possible de ne pas fertiliser la première génération, mais il faudra être bien conscient qu'une partie des éléments consommés ne sera pas renouvelée par les processus naturels. S'il s'agit de sols forestiers, les apports éventuels de fertilisants devront être pratiqués dès la plantation (environ 50 % de la dose nécessaire pour la durée de la révolution). Le complément (50 %) est à différer jusqu'à la fin de la période de forte immobilisation , c'est-à-dire entre 25 et 40 ans. Ensuite, l'immobilisation diminue et l'enrichissement du sol devrait suffire jusqu'à l'exploitation définitive.

- Plantations intensives. Il s'agit notamment des taillis à courte révolution, des peupleraies et es plantations destinées à fournir, en quantités aussi élevées que possible, des bois de trituration. On est toujours ici pratiquement dans le cas de la fertilisation-amélioration car les sols même riches ne peuvent soutenir ces cultures ; la fertilité doit ensuite être entretenue très strictement, car les bilans sont toujours déficitaires. Pendant presque toute la révolution, la demande sera très forte et la totalité de la production est en principe destinée à être exportée. Comme dans le cas précédent on fertilisera dès l'année d'installation de la culture, ou à deux ans dans le cas d'une coupe à blanc de taillis qui va rejeter. La durée de culture étant très courte et le coût d'une éventuelle fertilisation élevé, il sera sans doute judicieux, dans le cas des taillis à courte rotation, d'appliquer dès le début la totalité de la dose d'éléments nutritifs nécessaire. Dans le cas des peupleraies et des plantations pour bois-matière première, on fractionnera plutôt en deux apports (50 % à la plantation, 50 % à mi-révolution).

Rappelons cependant qu'en toute logique économique, étant donnée la faible valeur sur pied du bois produit, c'est sur des terrains riches, à forte capacité d'altération, et donc nécessitant le minimum d'apports additionnels, qu'il conviendrait de localiser de telles cultures (à moins d'une volonté politique aboutissant à subventionner ces productions dans les sols insuffisamment fertiles).

Conclusions

La fertilité chimique du sol n'est pas une ressource renouvelable, elle s'épuise plus ou moins rapidement, naturellement en fonction des climats, mais également en fonction de l'intensité de la sylviculture.

Les écosystèmes forestiers ont un fonctionnement très conservatif pour cette fertilité ; ce fonctionnement se traduit par un recyclage intense des éléments prélevés pour les besoins de la plante, et dont une partie très faible est en définitive fixée définitivement dans la biomasse pérenne et sera exportée lors des récoltes, si celles-ci se cantonnent aux seuls troncs.

Pour chaque écosystème, on peut définir une intensité de sylviculture telle que la fertilité du sol à moyen terme ne soit pas compromise : c'est cette intensité qu'il faut tendre à appliquer pour une gestion durable de l'écosystème, qui ne vise pas seulement à maintenir une production constante, mais doit s'entendre comme visant au maintien de la qualité des sols, des eaux de surface et de la biodiversité.

L'amélioration de la fertilité du sol conduisant à l'expression totale du potentiel de l'essence ne peut s'entendre que dans quelques situations de ligniculture intensive. Dans les autres situations, c'est la préservation de la fertilité existante qui devrait prévaloir.

Littérature citée :

AUGUSTO, L., RANGER, J., PONETTE Q. & RAPP M. (1999) : Relation entre la production et l'immobilisation d'éléments nutritifs pour quelques espèces forestières importantes (soumis aux Annales des Sciences Forestières)..

BADEAU V., DAMBRINE E., & WALTER Ch. (1999): Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. Etude et Gestion des Sols (Soumis).

BONNEAU, M., (1995) : Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF (ed) Nancy. 367p.

NYS, C. (1987) : Fonctionnement du sol et d'un écosystème forestier : étude des modifications dues à la substitution d'une plantation d'épicéa commun (Picea abies Karst.) à une forêt feuillue mélangée des Ardennes. Thèse d'Etat Nancy I. : 207 p.

POSZWA, A., DAMBRINE, E., POLLIER, B. & FICHTER, J. (1998) Mise en évidence in situ de l'acidification d'un sol forestier. Ecologie, 29, 1-2 : 333-340.

RANGER, J. & BONNEAU, M. (1984) : Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt. Rev. for. fr., XXXVI, 2 : 93-112.

RANGER, J. & BONNEAU, M. (1986) : Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Les effets de la sylviculture. Rev. for. fr., XXXVIII, 2 : 105-123.

RANGER, J. & TURPAULT, M.P. (1999): Input-output nutrient budgets as a diagnostic-tool for the sustainability of forest management. For. Ecol. Manage., (sous presse)

SWITZER, G.L. & NELSON, L.E (1973) : Maintien de la productivité avec des révolutions courtes. In Colloque International sur l'utilisation des engrais en forêt. FAO/IUFRO Paris décembre 1973, p355-381.

Définitions:

(1): Nitrification : transformation bactérienne en nitrate des ions ammonium du sol, eux-mêmes issus de la minéralisation de la matière organique.

(2): Pouvoir tampon du sol : capacité qu'a le sol de neutraliser l'effet des acides qui y arrivent, et ainsi d'empêcher une baisse de pH (un pH acide est un pH bas).

(3) : Proton: ion H+, ou H3O+ responsable de l'acidité.

(4) : complexe adsorbant : ensemble des constituants du sol dont les propriétés électronégatives leur permettent de fixer des ions positifs : calcium, magnésium, potassium, ou protons en particulier. C'est surtout la matière organique et les minéraux argileux.

(5) : Complexe colloïdal : idem que complexe adsorbant.

(6) : saturé, saturation : le complexe adsorbant est dit saturé lorsque ses sites électronégatifs sont occupés majoritairement par calcium, magnésium et potassium, et non par des ions responsables de l'acidité (protons; aluminium).

(7) : immobilisation : fixation d'éléments dans les organes pérennes (bois, écorces, racines...). S'oppose à la fixation provisoire dans les feuilles ou les radicelles. Les éléments immobilisés peuvent être exportés ou restitués à l'écosystème lors de l'exploitation.